

5 Validação do Software

Para garantir que os resultados deste trabalho sejam confiáveis, é preciso validar o simulador quanto às leis da física. Para tal, este capítulo apresenta dois casos onde há soluções analíticas.

No primeiro caso têm-se os resultados da simulação de uma **arrancada**. No segundo, a simulação de um **salto**. Para ambas as simulações são apresentadas soluções analíticas de modo a comparar os resultados. Foi utilizado um incremento no tempo de simulação (Δt) de 0,65 ms.

Os dados do veículo robótico usado em ambos os casos são apresentados na tabela a seguir:

Tabela 7 – Parâmetros do veículo para solução analítica

Parâmetro	Valor
Massa (kg)	50
Comprimento (cm)	64
Largura (cm)	22
Altura (cm)	10
Raio da roda (cm)	17
Rigidez (N/m)	10^4
Amortecimento (Ns/m)	500
Distância longitudinal entre eixos (cm)	36
Distância entre as rodas do mesmo eixo (cm)	32

5.1.

Validação da Simulação da Arrancada

O primeiro teste proposto para comparar os resultados do simulador com resultados analíticos é o da arrancada do veículo (Figura 37). Ele consiste em

acelerar o veículo mediante torques constantes nas rodas (no caso, só nas rodas traseiras) e monitorar as forças normais sobre as rodas e a inclinação do chassi em relação ao eixo t .

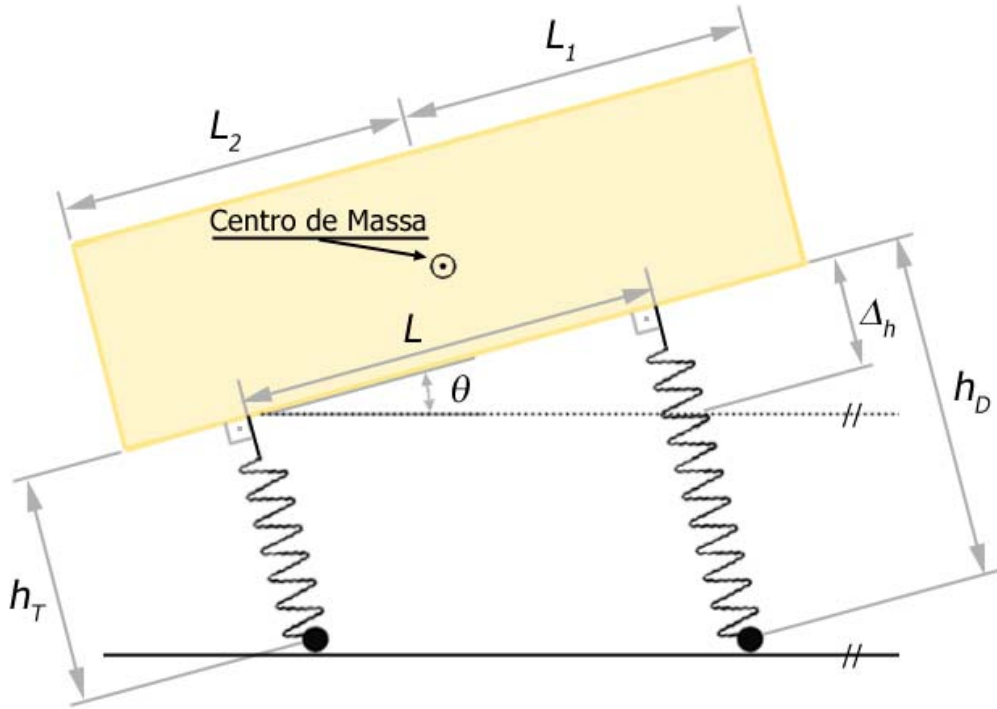


Figura 37 – Definição das grandezas utilizadas no cálculo da solução analítica para o teste de arrancada do veículo robótico

$$\Delta h = h_D - h_T \quad (5.1)$$

mas

$$h_D = F_{N_D} / k \quad (5.2)$$

$$h_T = F_{N_T} / k \quad (5.3)$$

$$\theta = \text{tg}^{-1} \left(\frac{\Delta h}{L} \right) \quad (5.4)$$

onde h_D é o deslocamento da suspensão dianteira, h_T é o deslocamento da suspensão traseira, F_{N_D} é força normal sobre a roda dianteira, F_{N_T} é a força normal sobre a roda traseira, k é a rigidez da suspensão e θ é o ângulo de guinada.

Segundo [62], as forças normais agindo sobre as rodas de um veículo de quatro rodas simétrico em relação ao plano XZ podem ser obtidas da seguinte forma:

$$F_{N_D} = \frac{PL_1}{2L} - \frac{Ph\ddot{X}}{2Lg} \quad (5.5)$$

$$F_{N_T} = \frac{PL_1}{2L} + \frac{Ph\ddot{X}}{2Lg} \quad (5.6)$$

onde F_{N_D} são as forças normais nas rodas dianteiras (numeradas como 0 e 3), F_{N_T} são as forças normais nas rodas traseiras (numeradas como 1 e 2), P é a força peso do veículo robótico, L é a distância entre os eixos dianteiro e traseiro, L_1 e L_2 são, respectivamente, as distâncias do centro de massa do veículo a sua extremidade da dianteira e traseira, h é a altura do centro de massa do veículo até ao terreno, g é a constante da gravidade e $\ddot{X}$, a aceleração do centro de massa do veículo.

O teste foi feito sob quatro condições diferentes nas simulações. Primeiro, foi imposta uma aceleração de $0,5739 \text{ m/s}^2$ e a circunferência das rodas foi discretizada, para calcular o ponto de contato entre roda e terreno, em 20 divisões. O resultado analítico encontrado nessas condições é de 116,3382 N para a força normal sob a suspensão dianteira e 128,9118 N para a traseira. Na simulação, esses valores foram de 115,9463 N para a dianteira e a traseira foi de 129,2491 N, o que representa um erro percentual em relação ao teórico de 0,34% para a suspensão dianteira e 0,26% para a traseira.

Para o ângulo de guinada do veículo (θ), a Equação (5.4) resulta em um valor de $0,2117^\circ$, utilizando os valores das forças normais extraído da simulação. Esse valor encontrado é o mesmo da simulação.

O erro nas forças normais encontradas se deve à discretização da roda para a procura do ponto de contato com o terreno, pois uma pequena variação desse ângulo de contato (γ) resulta em um erro no somatório de forças, tendo em vista que a força normal terá uma inclinação diferente da real. Quanto maior for essa diferença, maior será o erro encontrado.

Em um segundo teste, explorou-se a possibilidade de aumentar a discretização das rodas para 2.000 divisões. Essa alteração permitiu uma melhora para 0,03% no erro da suspensão dianteira e 0,02% para a traseira. Para o ângulo de guinada o erro continuou nulo.

No entanto, para essa melhoria o tempo médio de cálculo da iteração passou de 0,64 ms para 3,63 ms, representando um aumento de 467% do tempo de processamento da iteração no simulador. Tendo em vista que essa melhoria é muito cara computacionalmente, para as outras simulações deste trabalho serão utilizadas apenas 20 divisões nas rodas.

Outros dois testes de arrancadas foram feitos com acelerações maiores. No primeiro, foi imposta uma aceleração de $1,15 \text{ m/s}^2$, que gerou um erro na força normal sobre a suspensão dianteira de 0,70% e um erro de 0,41% na traseira. No segundo teste, com uma aceleração de $1,91 \text{ m/s}^2$, foi encontrado um erro para a força normal sobre a suspensão dianteira de 1,23% e de 0,46% na traseira.

Nas duas últimas simulações, os ângulos de guinada (θ) encontrados foram de respectivamente $0,4212^\circ$ e $0,697^\circ$ e coincidem com os ângulos encontrados no modo analítico.

Para terrenos planos e horizontais, a variação do ângulo teta é igual à variação do ângulo de contato gama, pois (para esse veículo) as suspensões estão fixas e sempre perpendiculares ao chassi. Com isso, esses ângulos aumentam para acelerações maiores. Com uma discretização de 20 divisões para o semicírculo representativo da roda (para o cálculo do ponto de contato roda-terreno), tem-se que os possíveis pontos de contato estão a cada 9° , onde o ângulo 0° foi convencionado ser a posição de repouso do veículo em terreno plano horizontal. Portanto, conforme o ângulo teta se distancia de 0° , mas permanece menor que $4,5^\circ$ (metade da resolução), o erro das forças normais aumenta, pois o ângulo do ponto de contato real gama (que deveria ser igual a teta) está se distanciando do calculado (0°), como foi dito anteriormente.

Um último teste de arrancada foi feito para ilustrar o problema descrito acima. Aumentou-se a discretização para 258 divisões, de maneira que a resolução para a procura do ponto de contato entre a roda e o terreno fosse de $0,6977^\circ$, muito próximo ao ângulo de guinada do veículo na última simulação. Ao manter a mesma aceleração imposta ao veículo, o erro encontrado para a força sobre a suspensão dianteira caiu para 0,09% e para 0,07% para a suspensão traseira. Esses

valores são próximos aos encontrados para a simulação com 2.000 divisões, apesar de serem utilizadas apenas 258 divisões.

Com isso, mostra-se que os erros encontrados para os valores das forças normais dianteiras e traseiras não dependem das condições dinâmicas ou cinemáticas do sistema, e sim do nível de detalhamento adotado para a representação geométrica do veículo robótico simulado.

5.2.

Validação da Simulação do Salto

O teste de simulação de **salto** (Figura 38) a fim de validar os resultados do simulador, consiste em monitorar a distância percorrida do veículo imediatamente após um salto a partir de uma rampa. Utilizando o recurso de configuração das condições iniciais do sistema por intermédio de scripts (**Anexo E e I**), foram configuradas, para as simulações, condições iniciais que retratassem o estado do sistema logo após o salto por uma rampa ao invés de simular o veículo passando, efetivamente, por ela.

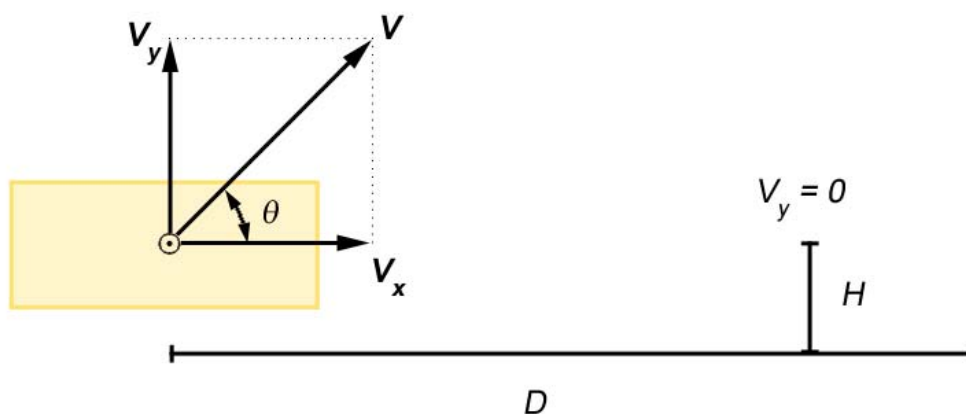


Figura 38 – Definição das grandezas utilizadas no cálculo da solução analítica para o teste de salto do veículo robótico

Como não foram consideradas forças aerodinâmicas no sistema durante o salto do veículo, a única componente da velocidade que é alterada é a vertical, devido à influência da gravidade. Portanto, para determinar a distância horizontal total percorrida pelo veículo durante o salto, é preciso calcular o tempo necessário para que o veículo pare de subir (a componente vertical da velocidade seja nula) e depois calcular o tempo até que ele volte para o terreno.

Sabendo-se que

$$S = S_0 + V_0 t + \frac{1}{2} a t^2 \quad (5.7)$$

e que

$$V = V_0 + a t \quad (5.8)$$

tem-se que

$$0 = V_y - g t_1 \therefore t_1 = \frac{V_y}{g} \quad (5.9)$$

onde V_y é a componente vertical da velocidade de saída da rampa do veículo robótico e t_1 é o tempo necessário para que o veículo chegue ao ponto mais alto da trajetória. Com isso, calcula-se a altura deste ponto, como mostra a Equação (5.10).

$$M = h + V_y t_1 - \frac{1}{2} g t_1^2 \quad (5.10)$$

onde M é altura máxima atingida pelo veículo e h é a sua altura inicial (assumida 0, para os cálculos). Em seguida, pode-se calcular o tempo de queda do veículo até o terreno como mostra a Equação (5.11).

$$M = \frac{1}{2} g t_2^2 \therefore t_2 = \sqrt{\frac{2M}{g}} \quad (5.11)$$

As Equações (5.12) e (5.13) mostram como determinar a distância horizontal total percorrida pelo veículo durante o salto, uma vez que, como as rodas não estão em contato com o terreno, não há aceleração nessa direção. Com isso, a distância total será

$$T = t_1 + t_2 \quad (5.12)$$

$$D = V_x T \quad (5.13)$$

onde D é a distância horizontal percorrida, T é o tempo total durante a trajetória e V_x é a componente horizontal da velocidade do veículo.

O veículo robótico inicia o salto em $x = 0,0$ e com velocidade em módulo de $V = 15\text{m/s}$. Foram feitos três testes, com variações apenas do ângulo inicial da velocidade.

No primeiro teste, o ângulo θ é de $22,5^\circ$ e ele toca o terreno, resultando em uma distância horizontal total de salto de $16,214\text{ m}$. No resultado analítico obtido nessas mesmas condições, a distância é de $16,218\text{ m}$ o que representa um erro de $0,02\%$.

No segundo teste, a simulação foi inicializada com um ângulo θ de 35° . Ele toca o terreno a uma distância de $21,548\text{ m}$. O resultado analítico obtido nessas mesmas condições é de $21,553\text{ m}$ o que representa um erro de $0,02\%$.

No terceiro teste, a simulação foi inicializada com um ângulo θ de 45° . Ele toca o terreno a uma distância de $22,930\text{ m}$. O resultado analítico obtido nessas mesmas condições é de $22,936\text{ m}$, o que representa um erro de $0,02\%$.

Esses resultados mostram a boa concordância entre os valores encontrados no simulador e os resultados analíticos correspondentes.

No próximo capítulo, os resultados de simulações deste estudo são apresentados.